

确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法*

雷廷武^{1,2} 张晴雯¹ 赵军¹ Mark A. Nearing³

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

(3 USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907 USA)

摘要 细沟中的泥沙主要来源于细沟流对土壤的剥蚀作用, 细沟剥蚀作用的大小由剥蚀率来表述。剥蚀率是侵蚀过程预报模型的重要物理参数, 本文创造性提出了一种确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法。该方法用细沟侵蚀模拟试验所确定的沟长与水流载沙量的函数关系, 以及相应的回归参数, 通过将函数对距离求导数, 得到了水流的剥离速率与细沟长度的函数关系。由此, 进一步确定了剥离速率与水流载沙量的函数关系。将由解析法得到的剥离速率与由试验数据直接计算得到的结果进行了对比, 得到不同坡度的确定系数下 R^2 值最小为 0.65 (坡度为 5), $n=16$, 最好的拟合 R^2 值 0.96 (坡度为 20), $n=24$, 证明了该解析方法的可行性。

关键词 剥离速率, 解析法, 细沟侵蚀

中图分类号 S157.1

当水流侵蚀力大于坡面上某一部分的土壤抗蚀力时, 发生强的水流剥蚀, 并在侵蚀坡面逐渐形成细沟。土壤剥蚀是指由侵蚀动力引起的土壤颗粒从土壤母质分离出来的过程。它有别于泥沙运输、沉积以及已沉积泥沙的再剥蚀过程^[1~4]。土壤剥蚀是细沟中泥沙的主要来源, 坡面上侵蚀量大的地方, 土壤剥蚀总是很活跃。细沟中的土壤剥蚀过程是很复杂的, 包括沟头的溯源侵蚀, 剪切力的下切侵蚀以及边壁的侧蚀冲刷。这些过程往往是同时发生的, 使得细沟剥蚀率的计算变得复杂了。

如何确定土壤剥蚀率一直是土壤侵蚀特别是土壤侵蚀模拟与预报研究所关注的问题。该项研究由土壤剥蚀率的基本定义出发, 推导了计算土壤剥蚀率的解析方法。并且将其计算结果与由设计的室内试验所得到的侵蚀产沙量求得的土壤剥蚀率进行了对比。

1 细沟剥蚀率的解析确定方法

水流中泥沙含量来源于水流对土壤的剥蚀。土壤剥蚀率定义为^[5~7]: 单位面积单位时间内土壤的剥蚀量。与此概念相对应的表述为下列定理。

* 中国科学院“引进国外杰出人才”项目(编号: 982602), 教育部项目(编号: 重大 01-10)资助

收稿日期: 2001-03-25; 收到修改稿日期: 2001-12-15

定理 土壤剥蚀率为(细沟中)单位宽度水流所含泥沙沿距离的变化率,或等价地说土壤剥蚀率为(细沟中)水流含沙量对距离的变化率与单宽流量之积。

证明 设泥沙含量为 $y(\text{kg m}^{-3})$, 流量 $Q(\text{m}^3 \text{s}^{-1})$, 沟宽 $w(\text{m})$, 单宽流量 $q(\text{m}^2 \text{s}^{-1}) = Q/w$, 土壤剥离速率 $D_r(\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 距离坐标为 $x(\text{m})$ 。根据土壤剥蚀率的定义, 设在细沟水流作用下, 细沟中的泥沙含量在 x 处为 y , 在 $x + \Delta x$ 处为 $y + \Delta y$, 则相应地两处的水流总挟沙量分别为 yQ 及 $(y + \Delta y)Q$, 对应的沟宽为 w 及 $w + \Delta w$, 该部分细沟的面积按梯形计算为 $A = (w + w + \Delta w) \Delta x / 2 = \Delta x(w + \Delta w / 2)$ 。泥沙含量的增加即是土壤由地表剥离的结果, 则根据土壤剥离率的定义有:

$$D_r = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{(y + \Delta y - y)Q}{\Delta x(w + \Delta w / 2)} \right] \quad (1)$$

当 Δx 趋于 0 时, 忽略无穷小量 Δw , 有:

$$D_r = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{Q}{w} = \frac{dy}{dx} q \quad (2)$$

式(2)即为所证, 即细沟剥蚀率为水流含沙量对距离的变化率与单宽流量之积。定理证毕。

雷廷武、张晴雯等设计并进行了一系列试验^[8,9], 用黄绵土得到了水流泥沙含量与细沟沟长(距离 x) 的关系如下:

$$y = A(1 - e^{-\beta x})^B \quad (3)$$

式中 y 为载沙量, x 为沟长, β 为衰减系数, A, B 为回归系数。将式(3)应用于式(2)得到:

$$D_r = \beta B A (1 - e^{-\beta x})^{B-1} e^{-\beta x} \quad (4)$$

$$D_r = \beta B q y \frac{e^{-\beta x}}{1 - e^{-\beta x}} = \beta B q y \left[(A/y)^{1/B} - 1 \right] \quad (5)$$

式(4)为剥离速率与沟长距离的关系, 而式(5)为剥离速率与水流含沙量的关系。由式(3)、(4)或式(3)、(5)可以计算剥蚀率。也就是说根据得到的解析式, 只要有载沙量与沟长的对应关系, 就可以得到细沟的剥蚀率。

2 结果与验证

2.1 参数的获取

雷廷武、张晴雯等用黄绵土进行了室内细沟侵蚀水槽试验^[8,9]。试验采用了 5 个坡度: $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$, 三种细沟入口流量: $2, 4, 8 \text{ L min}^{-1}$, 9 个坡长: $0.5\text{m}, 1\text{m}, 2\text{m}, 3\text{m}, 4\text{m}, 5\text{m}, 6\text{m}, 7\text{m}, 8\text{m}$ 沟长。测量得到了水流中泥沙含量与沟长的对应关系。由试验结果进行回归, 得到了式(3)以及相关的参数^[8]。为讨论方便起见, 将回归结果列入表 1。

2.2 剥蚀率与沟长及载沙量的关系

根据剥蚀率的基本定义, 剥蚀率等于单位时间单位面积净增加的含沙量, 由得到的 5 个实验坡度及 3 个入流量下的试验数据, 计算了不同试验条件下的剥蚀率。为了对剥蚀率以及与影响其变化的主要因子之间的关系有一个直观的概念, 做为一个特例, 本文给出了 20° 时不同流量下由实验数据计算得到的剥蚀率随载沙量的关系以及 25° 时剥蚀率随沟长的变化关系, 如图 1 和图 2 所示:

表 1 载沙量与沟长的回归结果

Table 1 Regression of sediment concentration with rill lengths

坡度 Slope	流量 Flow rate (L min ⁻¹)	A	β	B	R ²
5°	2	0.51	0.24	1.1	0.99
	4	0.51	0.26	1.07	0.97
10°	4	0.61	0.34	1.16	0.83
	8	0.61	0.34	1.52	0.81
15°	12	0.64	0.34	1.46	0.85
	2	0.78	0.4	1.73	0.87
20°	4	0.76	0.37	1.39	0.85
	8	0.76	0.45	1.25	0.92
25°	2	0.85	0.52	1.50	0.87
	4	0.80	0.51	0.92	0.96
25°	8	0.85	0.51	1.18	0.94
	2	0.82	0.5	1.09	0.94
25°	4	0.85	0.51	1.00	0.95
	8	0.87	0.55	1.04	0.96

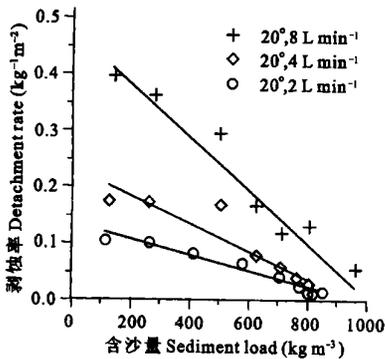


图 1 (20°) 剥蚀率随载沙量的变化趋势

Fig. 1 Detachment rate with sediment concentration

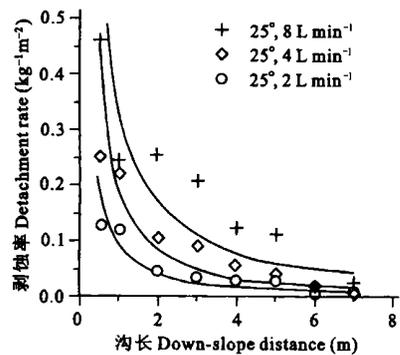


图 2 (25°) 剥蚀率随沟长的变化趋势

Fig. 2 Detachment rate with rill length

从图 1, 2 结果可以看出, 剥蚀率与径流含沙量与沟长有直接的关系, 且清水比挟沙水有更大的剥蚀率。在沟顶清水引入的地方剥蚀率最大, 随着沟长和径流中含沙量的增加, 剥蚀率开始减小。分析原因可能如下: 剥蚀率随沟长和载沙量的变化是与能量在侵蚀产沙过程中的分配是紧密联系的。在沟顶清水引入的地方, 径流能量用于剥蚀土粒, 此时的剥蚀率最大。剥蚀率大, 则径流剥蚀的土粒就多, 径流中的含沙量则会随之增大。反过来, 当径流中的含沙量增大时, 径流必然要分出一部分能量来挟带径流中的泥沙, 用于剥蚀泥沙的能量就相应减小。对实验结果进行了回归分析^[9], 剥蚀率随含沙量的增加呈线性减小, 剥蚀率随沟长的增加呈指数递减, 尤其在陡坡条件下递减更快, 从图 1 和图 2 中也可以看

出这种减小的变化趋势随流量的增加也更加明显。这是因为坡度变陡时, 股流的冲刷力和土体的下滑力增大; 入流量增加时, 冲刷土体的动能增大, 结果使得径流中的含沙量迅速增加, 由于能量不得不分配于搬运径流中的泥沙, 剥蚀土粒的能量则相应的随之减小。

2.3 解析结果的验证

将由解析式(6)和式(5)中已经得到的参数计算得到的剥离率, 与直接由试验数据计算所得剥离速率^[10]进行了相关分析, 对比结果示于图3。

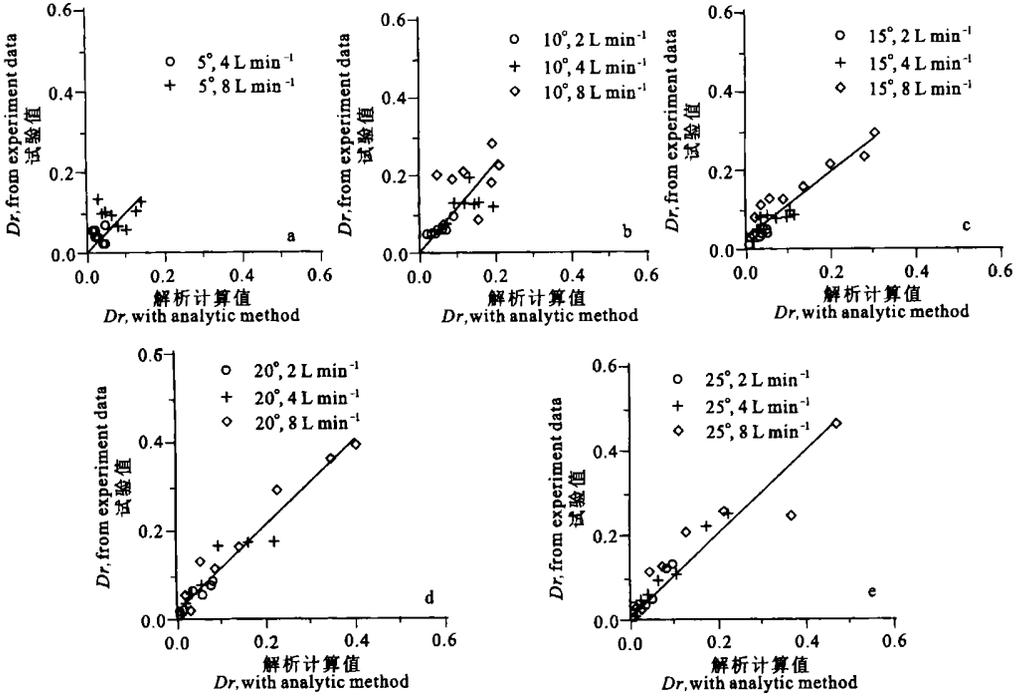


图3 解析法(沟长为自变量)确定的土壤剥离率与试验确定的土壤剥离率对比(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)

Fig. 3 Comparison of detachment rates computed by the analytic method with those estimated directly from experiment data(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)

图3是解析法确定的土壤剥离率与试验确定的土壤剥离率的1:1的对比相关分析图, 图中数据点越靠近斜线说明两种计算方法得出的结果相关性越好。由图中结果可以看出, 由解析法式(6)和式(5)所得到的剥离率和由试验数据直接得到的剥离率相关性很好, 而且随着坡度的增加, 数据点越靠近斜线, 即随坡度增大相关性增加。经回归分析, 得到确定系数值也很高, 最高的拟合(20°) R^2 值可达到0.96。不同坡度下 R^2 分别是为5°, 0.69, $n = 18$; 10°, 0.86, $n = 24$; 15°, 0.93, $n = 24$; 20°, 0.96, $n = 24$; 25°, 0.94, $n = 2$ 。由回归结果得到5°时的回归直线斜率为1.22, 10°时的直线斜率为1.45, 也就是说在这两种坡度下, 解析法确定的土壤剥离率比试验确定的土壤剥离率要小一些。坡度为15°, 20°, 25°时的直线斜率分别为1.0, 1.06和0.99, 这说明在这三种坡度下由两种计算方法得出的剥蚀经很接近。由文献^[9]可知, 5°时, 由试验数据直接计算的剥蚀率随沟长的变化无明显趋

势,从而解析法(是沟长的函数)计算结果也不十分理想。

将由解析式(7)和式(5)中计算得到的剥离率,与直接由试验数据计算所得到的剥离速率^[10]进行了相关分析,对比结果示于图4。

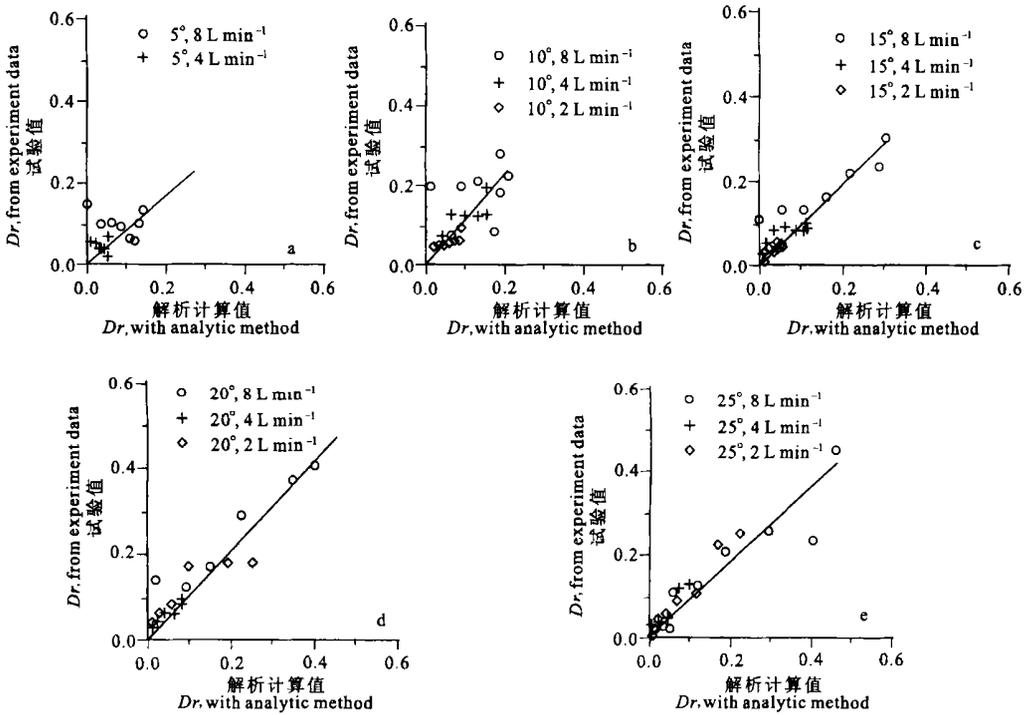


图4 解析法(含沙量为自变量)确定的土壤剥蚀率与试验确定值对比(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)

Fig. 4 Comparison of detachment rates computed by the analytic method with those estimated directly from experiment data(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)

图4可以看出由解析法式(7)和式(5)所得到的剥蚀率和由试验数据直接得到的剥蚀率同样显示了良好的相关性。相关分析得到的确定系数 R^2 分别为 5°, 0.65, $n=16$; 10°, 0.82, $n=21$; 15°, 0.91, $n=21$; 20°, 0.95, $n=21$; 25°, 0.93, $n=21$ 。图中的物理意义和图3是一样的,可以看出随着坡度的增加,数据点靠斜线越近,即相关性随坡度增大而增大。由图4和图3进行比较,它们的计算结果差别很小,也就是说,计算剥蚀率时可以用式(7)可以用式(6),其结果是一样的。总体来看,由计算结果可以说明,此解析方法是正确的,可以很好地用于剥蚀率计算。

3 结论

对于细沟剥蚀率的计算,由于其在土壤侵蚀过程中的重要性和影响因素的复杂性,一直是土壤侵蚀界关注的热点。本文提出的解析法给侵蚀试验提供了一种计算剥蚀率试验操作简便、理论可行的计算和试验方法。仅需要由试验确定载沙量与沟长的关系就可直接计算剥离率,大大地简便了现有的剥蚀率的计算方法和试验方法,且经过试验验证,这

种解析方法具有较高的测定准确性。因此, 本文提出的解析法, 对侵蚀过程研究的深入和坡面水蚀预测预报模型的建立, 提供了重要的试验方法和参数确定方法。

致 谢 本研究的实验工作承蒙巨风生先生和王长斌先生的大力协助, 在此深表谢意。

参 考 文 献

1. Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 1997, 33(4): 865~876
2. Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE*, 1972, 15(1): 99~ 102
3. Nearing M A, Foster G R, Lane L J. A process based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. of ASAE*, 1989, 32: 1 587~ 1 593
4. 雷廷武, 邵明安, 李占斌. 土壤侵蚀预报模型和在中国发展的战略考虑. *水土保持研究*, 1999(2): 162~ 169
5. Cochrane T A, Flanagan D C. Detachment in a simulated rill. *Transactions of the ASAE*, 1996, 40(1): 111~ 119
6. Lei T W, Nearing M A, Haghighi K, *et al.* Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 3 157~ 3 168
7. Franti T G, Laflen JM, Watson D A. Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(2): 329~ 335
8. 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 细沟侵蚀动力过程输沙能力研究. *土壤学报*, 2002, 39(4): 476~ 482
9. 张晴雯, 雷廷武, 赵军. 含沙水冲刷率与含沙量及沟长的耦合关系. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 92~ 95

ANALYTIC METHOD FOR DETERMINATION OF DETACHMENT RATE OF CONCENTRATED FLOW IN EROSION RILLS

Lei Ting-wu^{1,2} Zhang Qing-wen¹ Zhao Jun¹ Mark A. Nearing³

(1 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100*)

(2 *Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083*)

(3 *USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907 USA*)

Summary

An analytic method for determining detachment rate of concentrated flow in erosion rills was advanced in the paper. By making use of the functional relation of sediment load with rill length and the corresponding regression parameters obtained from simulated erosion experiments this method estimated functional relations of detachment rates of concentrated flows with rill length. Then relationship between detachment rate and sediment load in the flowing water was derived from this function. Comparison of the detachment rates thus computed with those directly estimated on the basis of experimental data was conducted to prove feasibility of this method.

Key words Detachment rate, Analytical Method, Rill erosion